



УДК 621.315.592

Г. П. Гайдар, П. І. Баранський

Експериментальний доказ незмінності форми ізоенергетичних еліпсоїдів n -Ge в умовах сильної одновісної пружної деформації

(Представлено членом-кореспондентом НАН України П. М. Томчуком)

На зразках n -Ge одержано експериментальний доказ того, що в умовах сильної направленої пружної деформації відбувається лише відносне зміщення ізоенергетичних еліпсоїдів у шкалі енергій, однак форма еліпсоїдів залишається при цьому незмінною.

Ключові слова: германій, ізоенергетичний еліпсоїд, пружна деформація, тензоопір.

Енергетична еквівалентність долин багатодолинного напівпровідника типу n -Si або n -Ge може бути порушена при пружному деформуванні кристала в напрямі, відносно якого ізоенергетичні еліпсоїди розташовані несиметрично. Актуальність цієї обставини вперше була виявлена в досліджах Сміта [1] з вивчення ефекту тензоопору в кристалах Ge та Si, а Херрінг [2] вперше показав, що спостережувана зміна питомого опору багатодолинних напівпровідників при одновісній пружній деформації пов'язана з деформаційним порушенням енергетичної еквівалентності ізоенергетичних еліпсоїдів у таких дослідках і наступним за ним міжмінімумним (міжеліпсоїдним) перерозподілом носіїв струму при незмінній ($n_e = \text{const}$) їх концентрації в зоні провідності (c -зоні). Зсув за шкалою енергій еквівалентних (до накладання на кристал деформуючих зусиль) мінімумів енергії залежить від напрямку осі деформації.

Пружна направлена деформація приводить до зміни як міжатомних відстаней, так і симетрії кристала. Однак значні зміни в зонній структурі кристала виникають лише при виконанні умови $\Delta\varepsilon \gg kT$, де $\Delta\varepsilon$ відповідає міжмінімумному зміщенню, спричиненому направленою деформацією.

У роботі [3] в дослідках із кристалами n -Ge показано, що навіть при симетричному розміщенні осі деформації відносно ізоенергетичних еліпсоїдів, тобто, при $\vec{X} // \vec{J} // [100]$ (де X — величина механічного напруження на кристалі, J — струм), коли міжмінімумний перерозподіл носіїв заряду всередині зони провідності, в принципі, виключений, при досить високих механічних навантаженнях $X > 1$ або 1,5 ГПа (відповідно для температур

$T = 300$ і 78 К) виникає тензоопір, пов'язаний із закидом носіїв заряду з мінімумів типу $\langle 111 \rangle$ в більш високо розміщені мінімуми типу $\langle 100 \rangle$.

Відмінний від нуля тензоопір при $\vec{X} // \vec{J} // [111]$ у кристалах n -Si в області лінійної зміни питомого опору ρ від механічного навантаження X вперше досліджено в роботі [4]. Про наявність нелінійної (і істотної за величиною) залежності ρ від X в n -Si для тієї ж орієнтації $\vec{X} // \vec{J} // [111]$, але при більших механічних навантаженнях, повідомлено в [5].

Особливістю тензоопору, що виникає в n -Si при $\vec{X} // \vec{J} // [111]$, яка в принципі відрізняє його від тензоопору, що виникає при симетричному розміщенні осі деформації відносно ізоенергетичних еліпсоїдів в n -Ge, є характерне для n -Si зростання ρ_X/ρ_0 , починаючи з найменших механічних напружень стиску X . При врахуванні цієї обставини (і даних щодо зонної структури Si) виявилось [6], що для пояснення природи тензоопору, який виникає при $\vec{X} // \vec{J} // [111]$ в n -Si, неможливо застосовувати уявлення, використані в роботі з n -Ge [3], тобто представлення Сміта-Херрінга. І оскільки холлівські виміри однозначно вказували на незалежність повної концентрації носіїв струму від X в n -Si, що деформується в напрямку $[111]$, а міжмінімумний перерозподіл за цих умов виключений, то причиною зміни $\rho_X/\rho_0 = f(X)$, яка спостерігалася експериментально, могла бути тільки залежність рухливості електронів μ від деформації X . Дійсно, як теорія [7], так і дані щодо циклотронного резонансу [8] в одновісно деформованому n -Si показують, що за наявності компоненти деформації зсуву (характерної для $\vec{X} // [111]$ в n -Si) поперечна ефективна маса m_{\perp} лінійно зростає з ростом X (приблизно на 1% на кожні 0,25 ГПа). Отже, згідно з [6], в n -Si можлива поява тензоопору, пов'язаного зі зміною рухливості $\mu = \mu(X)$, що викликається ростом m_{\perp} з підвищенням X при таких орієнтаціях механічних напружень, коли можлива поява компонент деформації зсуву (зокрема при $\vec{X} // \vec{J} // [111]$).

Досліди з використанням направленої пружної деформації при вивченні властивостей n -Ge зазвичай проводилися в припущенні, що ізоенергетичні еліпсоїди зазнають лише зміщень у шкалі енергії, але форма їх при цьому залишається незмінною. Однак подібне припущення не було експериментально перевірено. Метою даної роботи є ліквідація цієї прогалини.

Вважатимемо одновісну пружну деформацію *сильною*, якщо вона забезпечує при відповідних умовах дослідів (при сталій температурі) отримання енергетичної щільності між еквівалентними в недеформованому кристалі мінімумами, достатньої для повного переселення носіїв заряду зі всіх мінімумів, що піднімаються вверх (по шкалі енергії) в один (при $\vec{X} // \vec{J} // [111]$) або два (при $\vec{X} // \vec{J} // [110]$) мінімуми, що опускаються в зоні провідності (c -зоні) кристалів n -Ge.

Для постановки експерименту використано дві серії зразків n -Ge (по чотири зразки в кожній) з концентраціями носіїв заряду $1,5 \cdot 10^{13}$ і $9,5 \cdot 10^{13}$ см⁻³ відповідно. Два зразки з кожної серії вирізалися в кристалографічному напрямку $[111]$, а два інші — в напрямку $[110]$. Зміни тензоопору кристалів n -Ge вимірювалися при температурі 77,4 К. Одержані результати наведено на рис. 1.

Один із важливих елементів теорії Херрінга [2], в якій вперше розглянуто механізм появи тензоопору в багатодолинних напівпровідниках, пов'язаний із відносним зміщенням в шкалі енергій ізоенергетичних еліпсоїдів, хоча форма останніх (а, отже, і величини ефективних мас вздовж великої осі еліпсоїда m_{\parallel} і перпендикулярно до неї m_{\perp} в кожному з них) залишалася незмінною.

Виключна важливість прийнятого Херрінгом припущення, а головне — вказівка теорії [7] на те, що зміни форми ізоенергетичних еліпсоїдів (пов'язані зі зміною ефективних мас) у більш високих наближеннях теорії збурення (при виконанні деяких умов) дійсно мо-

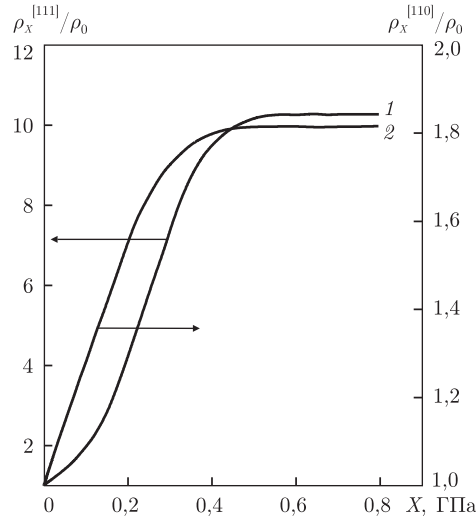


Рис. 1. Залежності тензоопору від механічних напружень X , виміряні при температурі $T = 77,4$ К на зразках n -Ge (з питомим опором $\rho_{300\text{К}} = 17$ Ом·см і концентрацією носіїв заряду $n_e = 9,5 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$) різної кристалграфічної орієнтації: 1 – $\rho_X^{[111]}/\rho_0 = f(X)$, $\rho_\infty^{[111]}/\rho_0 = 10,26$; 2 – $\rho_X^{[110]}/\rho_0 = f(X)$, $\rho_\infty^{[110]}/\rho_0 = 1,815$

жуть з'являтися, стимулювали експериментальну перевірку обговорюваного припущення в дослідях з n -Ge, виконану в роботах [9, 10]. Зважаючи на те, що застосовані в цих роботах методики не можуть бути віднесені до розряду гранично простих, а також враховуючи принципову значущість раніше виконаної перевірки ідеї Херрінга, виникало природне бажання провести аналогічну перевірку обговорюваної ідеї на більш високому методичному рівні, що і було зроблено в даній роботі.

З'ясувалося, що для досягнення поставленої мети можна відмовитися від використання залежності $K = f(\rho_\infty^{[110]}/\rho_0)$, яка знадобилася авторам [10] для відповідного аналізу, а також уникнути характерних для згаданої роботи порівнянь значень поперечних рухливостей носіїв заряду в окремо взятому ізоенергетичному еліпсоїді $\mu_\perp = (3/\rho_0 - 1/\rho_\infty^{[111]})/(2en_e)$ і $\mu_\parallel = (2/\rho_0 - 1/\rho_\infty^{[110]})/(en_e)$, які вимірювалися в [10] у дослідях з n -Ge за умов $\vec{X} // \vec{J} // [111]$ та $\vec{X} // \vec{J} // [110]$ відповідно. При цьому $\rho_\infty^{[111]} = \lim_{X \rightarrow \infty} \rho(X)$ і $\rho_\infty^{[110]} = \lim_{X \rightarrow \infty} \rho(X)$ – значення питомого опору при деформації X , яка забезпечує повне переселення носіїв струму в мінімум енергії (або два мінімуми), розташований(і) в напрямку осі деформації [111] (або [110]), а ρ_0 – питомий опір кристала при відсутності деформації.

Оскільки

$$\rho_\infty^{[110]} = \frac{1}{en_e} \frac{3}{(\mu_\perp + 2\mu_\parallel)}, \quad (1)$$

$$\rho_\infty^{[111]} = \frac{1}{en_e \mu_\parallel}, \quad (2)$$

де e – заряд електрона, а n_e – повна концентрація носіїв струму в кристалі, то параметр анізотропії рухливості в окремо взятому ізоенергетичному еліпсоїді має вигляд:

$$K = \frac{\mu_\perp}{\mu_\parallel} = \frac{K_m}{K_\tau} = \frac{m_\parallel \langle \tau_\perp \rangle}{m_\perp \langle \tau_\parallel \rangle} = 3 \frac{\rho_\infty^{[111]}}{\rho_\infty^{[110]}} - 2, \quad (3)$$

Таблиця 1. Результати обробки дослідних даних щодо тензоопору, одержаних при $T = 77,4$ К на зразках n -Ge різної кристалографічної орієнтації і рівня легування

| № серії | $n_e, \text{см}^{-3}$ | $\rho_{\infty}^{[111]}/\rho_0$ | $\rho_{\infty}^{[111]}/\rho_{\infty}^{[110]}$ | $K = \mu_{\perp}/\mu_{\parallel}$, знайдене за формулою (3) | $K = \mu_{\perp}/\mu_{\parallel}$, знайдене за формулою (4) |
|---------|-----------------------|--------------------------------|---|--|--|
| 1 | $1,5 \cdot 10^{13}$ | 10,93 | 6,0 | 16,0 | 15,9 |
| 2 | $9,5 \cdot 10^{13}$ | 10,26 | 5,66 | 15,0 | 14,98 |

де $K_m = m_{\parallel}/m_{\perp}$ – параметр анізотропії ефективної маси; $K_{\tau} = \langle \tau_{\parallel} \rangle / \langle \tau_{\perp} \rangle$ – параметр анізотропії розсіяння; τ_{\parallel} і τ_{\perp} – компоненти тензора часу релаксації при відсутності магнітного поля в лінійному наближенні. Прогрес у підвищенні надійності (і точності) перевірки недеформованості ізоенергетичних еліпсоїдів n -Ge у даній роботі забезпечувався за рахунок того, що передумови для деформованості еліпсоїдів (на той випадок, коли вона б стала реальною) виявилось можливим ввести в одне і те ж співвідношення (3) та ще й у вигляді відношення вимірюваних величин.

А повний збіг значень параметра анізотропії рухливості K (див. табл. 1), отриманих за умов вимірів тензоопору $\rho_{\infty}^{[111]}/\rho_0$ і $\rho_{\infty}^{[110]}/\rho_0$ при прикладанні тиску X в двох напрямках і використання формули (3), а також загальноприйнятого виразу (4)

$$K = \frac{3 \rho_{\infty}^{[111]}}{2 \rho_0} - \frac{1}{2}, \quad (4)$$

можна приймати за переконливий доказ недеформованості ізоенергетичних еліпсоїдів у дослідях з кристалами германію n -типу.

Таким чином, експериментально доведено, що при накладанні на кристали n -Ge одновісної пружної деформації стиску X відбувається лише зміщення ізоенергетичних еліпсоїдів в шкалі енергій, але форма еліпсоїдів залишається незмінною. Цей висновок тим більш цікавий, що в дослідях з n -Si, з урахуванням даних робіт [6, 8], в яких показано збільшення поперечної ефективної маси m_{\perp} з ростом механічних напружень X за умов, при яких можливий прояв компонент деформації зсуву, повна недеформованість ізоенергетичних еліпсоїдів не зберігається. В цьому є суттєва відмінність сильної направленої деформації кристалів n -Ge від аналогічної деформації кристалів кремнію n -типу.

Цитована література

1. *Smith C. S.* Piezoresistance effect in germanium and silicon // *Phys. Rev.* – 1954. – **94**, No 1. – P. 42–49.
2. *Herring C.* Transport properties of a many-valley semiconductor // *Bell System. Techn. J.* – 1955. – **34**, No 2. – P. 237–290.
3. *Баранский П. И., Колomoец В. В., Федосов А. В.* Пьезосопротивление, возникающее в условиях симметричного расположения оси деформации относительно всех изоэнергетических эллипсоидов в n -Ge // *Физика и техника полупроводников.* – 1976. – **10**, № 11. – С. 2179–2181.
4. *Tufte O. N., Stelzer E. L.* Piezoresistive Properties of Heavily Doped n -Type Silicon // *Phys. Rev.* – 1964. – **133**, No 6A. – P. A1705–A1716.
5. *Baranskii P. I., Kolomoets V. V., Fedosov A. V.* The angular dependences of the longitudinal piezoresistance of n -Ge and n -Si at 78 K // *Phys. Stat. Sol. (A).* – 1976. – **34**, No 2. – P. K139–K141.
6. *Баранский П. И., Колomoец В. В., Федосов А. В.* Пьезосопротивление, возникающее в условиях симметричного расположения оси деформации относительно всех изоэнергетических эллипсоидов в n -Si // *Физика и техника полупроводников.* – 1979. – **13**, № 4. – С. 815–819.
7. *Бир Г. Л., Пикус Г. Е.* Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. – Москва: Наука, 1972. – 587 с.

8. *Hensel J. C., Hasegawa H., Nakayama M.* Cyclotron Resonance in Uniaxially Stressed Silicon. II. Nature of the Covalent Bond // *Phys. Rev.* – 1965. – **138**, No 1A. – P. A225–A238.
9. *Baranskii P. I., Buda I. S., Dakhovskii I. V., Kolomoets V. V.* Piezoresistance and Magnetopiezoresistance of *n*-Ge in the [110] direction // *Phys. Stat. Sol. (B)*. – 1971. – **46**, No 2. – P. 791–796.
10. *Баранский П. И., Елизаров А. И., Коломоец В. В.* Определение характеристических параметров μ_{\parallel} и μ_{\perp} отдельно взятого изоэнергетического эллипсоида в многодолинных полупроводниках // *Физика и техника полупроводников*. – 1974. – **8**, № 1. – С. 200–202.

References

1. *Smith C. S.* *Phys. Rev.*, 1954, **94**, No 1: 42–49.
2. *Herring C.* *Bell System Techn. J.*, 1955, **34**, No 2: 237–290.
3. *Baranskiy P. I., Kolomojets V. V., Fedosov A. V.* *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 1976, **10**, No 11: 2179–2181 (in Russian).
4. *Tufte O. N., Stelzer E. L.* *Phys. Rev.*, 1964, **133**, No 6A: A1705–A1716.
5. *Baranskii P. I., Kolomoets V. V., Fedosov A. V.* *Phys. Stat. Sol. (A)*, 1976, **34**, No 2: K139–K141.
6. *Baranskiy P. I., Kolomojets V. V., Fedosov A. V.* *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 1979, **13**, No 4: 815–819 (in Russian).
7. *Bir G. L., Pikus G. Ye.* *Simmetriya i deformatsionnye efekty v poluprovodnikakh*, Moskva: Nauka, 1972 (in Russian).
8. *Hensel J. C., Hasegawa H., Nakayama M.* *Phys. Rev.*, 1965, **138**, No 1A: A225–A238.
9. *Baranskiy P. I., Buda I. S., Dakhovskii I. V., Kolomoets V. V.* *Phys. Stat. Sol. (B)*, 1971, **46**, No 2: 791–796.
10. *Baranskiy P. I., Yelizarov A. I., Kolomojets V. V.* *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 1974, **8**, No 1: 200–202 (in Russian).

*Институт ядерних досліджень НАН України, Київ
 Інститут фізики напівпровідників
 ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, Київ*

Надійшло до редакції 22.01.2015

Г. П. Гайдар, П. И. Баранский

Экспериментальное доказательство неизменности формы изоэнергетических эллипсоидов *n*-Ge в условиях сильной одноосной упругой деформации

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев
 Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАН Украины, Киев*

*На образцах *n*-Ge получено экспериментальное доказательство того, что в условиях сильной направленной упругой деформации происходит лишь относительное смещение изоэнергетических эллипсоидов в шкале энергий, однако форма эллипсоидов остается при этом неизменной.*

Ключевые слова: германий, изоэнергетический эллипсоид, упругая деформация, тензосопротивление.

G. P. Gaidar, P. I. Baranskii

Experimental proof of the shape constancy for isoenergetic ellipsoids in n -Ge under strong uniaxial elastic deformation

Institute of Nuclear Research of the NAS of Ukraine, Kiev

V. Ye. Lashkaryov Institute of Semiconduction Physics of the NAS of Ukraine, Kiev

The experimental proof of the fact that, under a strong uniaxial elastic deformation of n -Ge samples, the isoenergetic ellipsoids are displaced only relatively on the energy scale, whereas the shape of ellipsoids remains unchanged, is obtained.

Keywords: germanium, isoenergetic ellipsoid, elastic deformation, tensorresistance.